

Máquinas térmicas e de fluxo

Aula 08:

Análises de Energia em Sistemas fechados

DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos
Engenheiro Mecânico
CREA MG 106478D

Rio de Janeiro, 31 de maio 2023

Samuel Moreira Duarte Santos

Agenda

- Equação de estado do gás ideal;
- Primeira lei da termodinâmica para sistemas fechados; e
- Aplicação prática cotidiana.

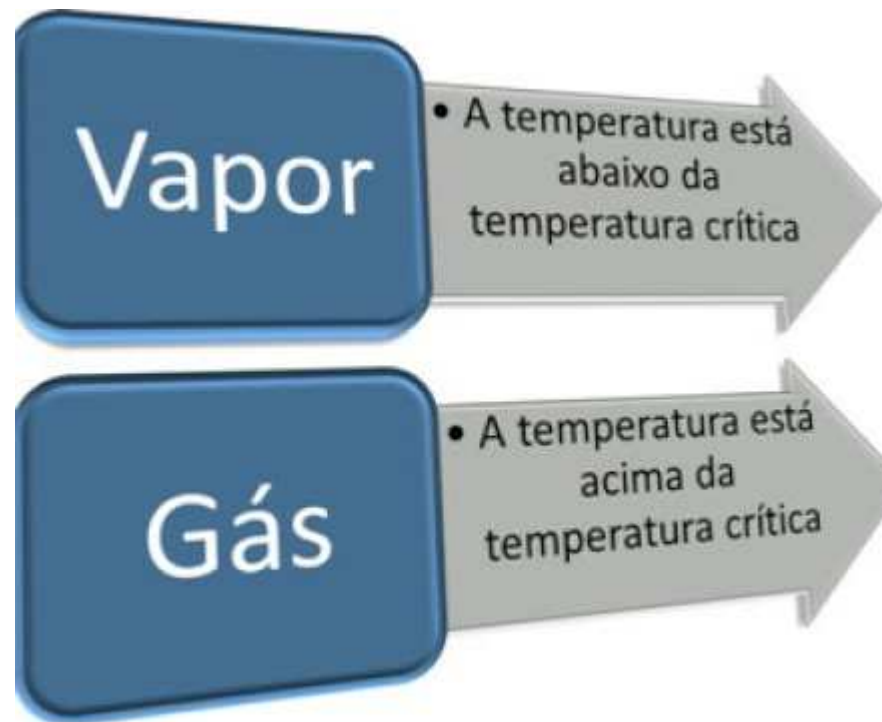
Equação de estado do gás ideal

Equação de estado do gás ideal

- Tabelas de propriedades fornecem informações bastante exatas sobre as propriedades, mas elas são volumosas e sujeitas a erros de digitação;
- Uma abordagem mais prática e desejável seria ter algumas relações entre as propriedades que fossem simples e suficientemente gerais e precisas;
- Qualquer equação que relacione pressão, temperatura e volume específico de uma substância é chamada de **equação de estado**;
- A equação de estado para substâncias na fase gasosa mais simples e mais conhecida é a **equação de estado do gás ideal**;
- Essa equação prevê o **comportamento P-v-T** de um gás com bastante precisão dentro de uma determinada região.

Equação de estado do gás ideal

- Gás e vapor são frequentemente usados como sinônimos;
- A fase vapor de uma substância é normalmente chamada de gás quando está acima da temperatura crítica;
- Em geral, entende-se por vapor um gás que não está longe do estado da condensação;



Equação de estado do gás ideal

- Em 1802, os franceses J. Charles e J. Gay-Lussac, determinaram experimentalmente que a baixas pressões o volume de um gás é proporcional à sua temperatura;



$$Pv = RT$$

- Onde a constante de proporcionalidade **R** é chamada de **constante do gás**;
- A equação é chamada de equação de estado do gás ideal, ou simplesmente relação do gás ideal, e um gás que obedece a essa relação é chamado de gás ideal.

Equação de estado do gás ideal

- A constante R do gás é diferente para cada gás e é determinada a partir de

$$R = \frac{R_u}{M} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

- Onde R_u é chamada de **constante universal dos gases**;

$$R_u = \begin{cases} 8,31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 8,31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 0,0831447 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 1,98588 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} \\ 10,7316 \text{ psia} \cdot \text{pé}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R} \\ 1.545,37 \text{ pé} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot \text{R} \end{cases}$$

- M é a **massa molar** (também chamada de peso molecular);

Equação de estado do gás ideal

A massa de um sistema é igual ao produto de sua massa molar M e o número de mols N :

$$m = MN[kg]$$

Samuel Moreira

Substância	Fórmula	Massa molar, M kg/kmol	Constante do gás, R kJ/kg·K*
Ar	—	28,97	0,2870
Amônia	NH ₃	17,03	0,4882
Argônio	Ar	39,948	0,2081
Benzeno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064
Bromo	Br ₂	159,808	0,0520
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,1889
Monóxido de carbono	CO	28,011	0,2968
Tetracloroeto de carbono	CCl ₄	153,82	0,05405
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173
Clorofórmio	CHCl ₃	119,38	0,06964
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078
Etano	C ₂ H ₆	30,070	0,2765
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964
Hélio	He	4,003	2,0769
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240
Kriptônio	Kr	83,80	0,09921
Metano	CH ₄	16,043	0,5182
Álcool metílico	CH ₃ OH	32,042	0,2595
Clorometano	CH ₃ Cl	50,488	0,1647
Neônio	Ne	20,183	0,4119
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968
Óxido nitroso	N ₂ O	44,013	0,1889
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,1976
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	0,1298
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137,37	0,06052
Água	H ₂ O	18,015	0,4615
Xenônio	Xe	131,30	0,06332

Equação de estado do gás ideal

$$V = mv \rightarrow PV = mRT$$

$$mR = (MN)R = NR_u \rightarrow$$

$$PV = NR_u T$$

$$V = N\bar{v} \rightarrow P\bar{v} = R_u T$$

\bar{v} É o volume específico molar, ou seja, o volume por unidade de mol (em m³/kmol)

Substância	Fórmula	Massa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante do gás, <i>R</i> kJ/kg·K*
Ar	—	28,97	0,2870
Amônia	NH ₃	17,03	0,4882
Argônio	Ar	39,948	0,2081
Benzeno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064
Bromo	Br ₂	159,808	0,0520
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,1889
Monóxido de carbono	CO	28,011	0,2968
Tetracloreto de carbono	CCl ₄	153,82	0,05405
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173
Clorofórmio	CHCl ₃	119,38	0,06964
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078
Etano	C ₂ H ₆	30,070	0,2765
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964
Hélio	He	4,003	2,0769
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240
Kriptônio	Kr	83,80	0,09921
Metano	CH ₄	16,043	0,5182
Álcool metílico	CH ₃ OH	32,042	0,2595
Clorometano	CH ₃ Cl	50,488	0,1647
Neônio	Ne	20,183	0,4119
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968
Óxido nitroso	N ₂ O	44,013	0,1889
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,1976
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	0,1298
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137,37	0,06052
Água	H ₂ O	18,015	0,4615
Xenônio	Xe	131,30	0,06332

Equação de estado do gás ideal

- Um gás ideal é uma substância *imaginária* que obedece à relação:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = R$$

- Foi observado experimentalmente que a relação do gás ideal se aproxima bastante do comportamento P - v - T dos gases reais a baixas densidades;
- A baixas pressões e altas temperaturas, a densidade de um gás diminui, e, nessas condições, ele se comporta como um gás ideal.

Equação de estado do gás ideal

- Por questões práticas, muitos gases, como o ar, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, hélio, argônio, neônio, kriptônio e até mesmo gases mais pesados, como o dióxido de carbono, podem ser tratados como gases ideais com uma margem de erro desprezível (frequentemente com erros menores que 1%);
- Gases densos, como o vapor de água das usinas de potência a vapor e o vapor de refrigerante dos refrigeradores, porém, não devem ser tratados como gases ideais; e
- Para essas substâncias devem ser usadas as tabelas de propriedades.

Fator de compressibilidade

- O fator de compressibilidade é uma correção da equação de gás ideal para gases reais;

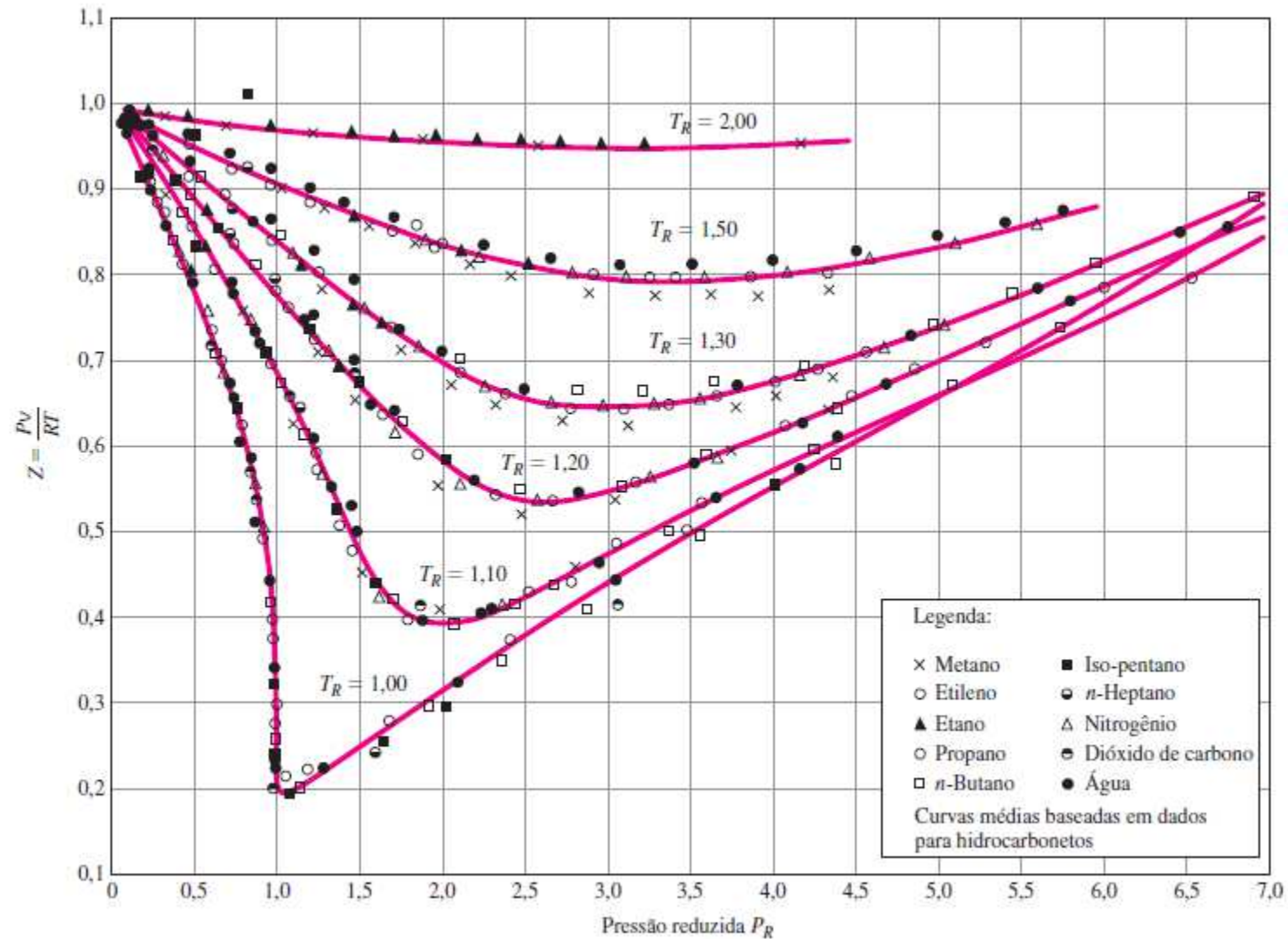
$$Z = \frac{Pv}{RT} \rightarrow Pv = ZRT$$

- Onde:

$$Z = \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \rightarrow v_{ideal} = \frac{RT}{P}$$

- Z é o fator de compressibilidade e pode ser obtido da Figura

Fator de compressibilidade



Fator de compressibilidade

- Casos onde pode ser considerado gás ideal ($Z \approx 1$):

Caso 1	Caso 2
$p_r < 0,1$ Qualquer T_r	$p_r < 2$ $T_r \geq 2$

- Onde:

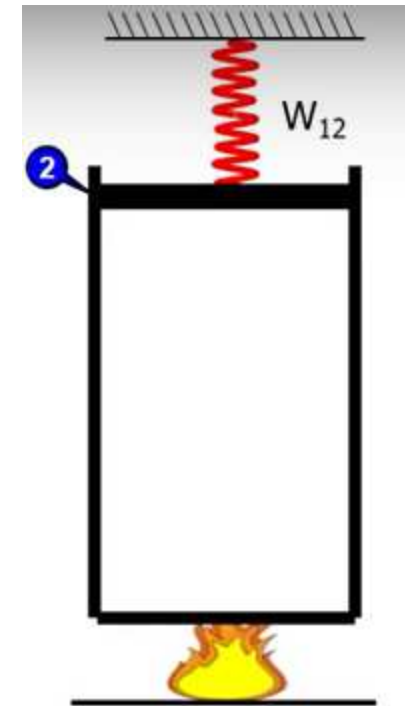
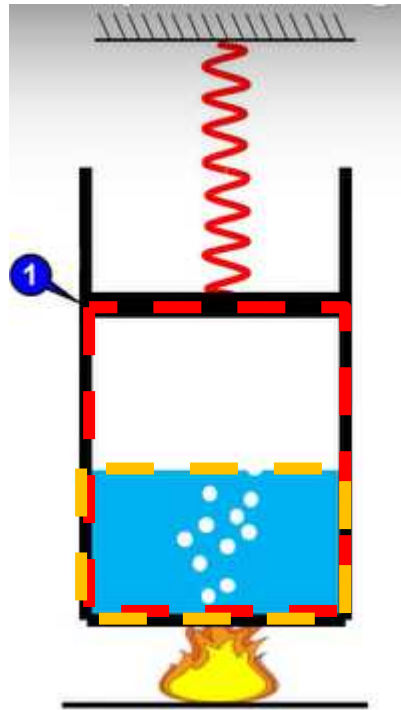
$$p_r = \frac{p}{p_c}$$
$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

- p_r e T_r são a pressão e temperatura reduzidas; e
- p_c e T_c são a pressão e temperatura críticas.

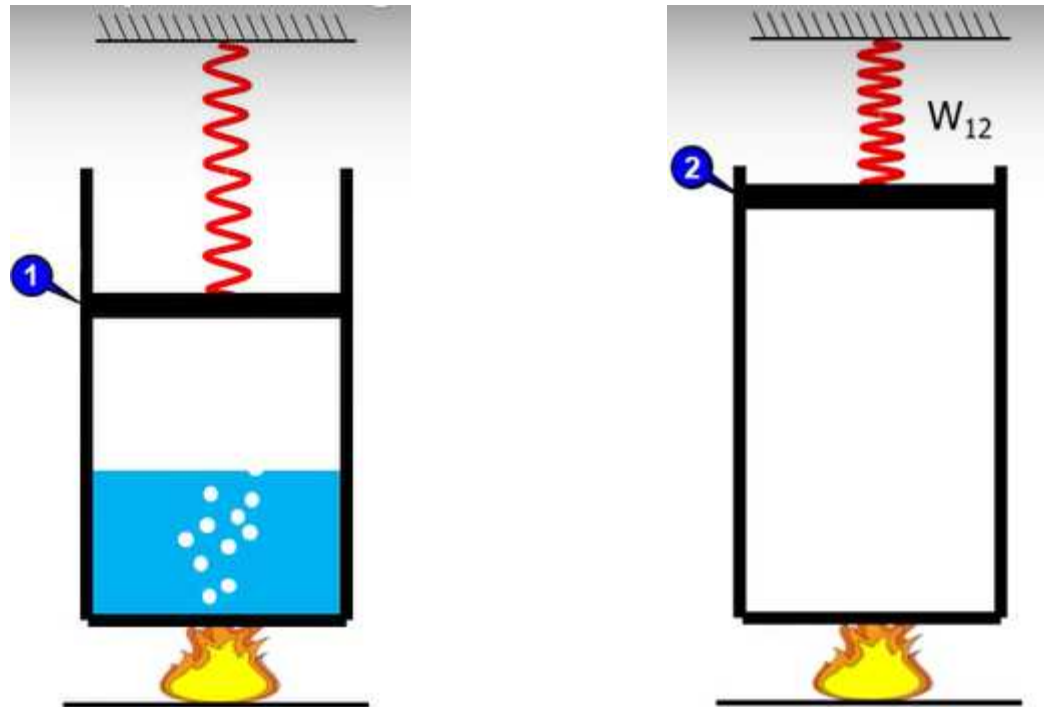
Primeira lei da termodinâmica para sistemas

Sistemas termodinâmicos

- Fechado: não há fluxo de massa em suas fronteiras;
- Aberto: há fluxo de massa em suas fronteiras



Sistemas termodinâmicos



Q_{12} = calor fornecido para o sistema (>0)

W_{12} = trabalho executado pelo sistema (>0)

Sistemas termodinâmicos

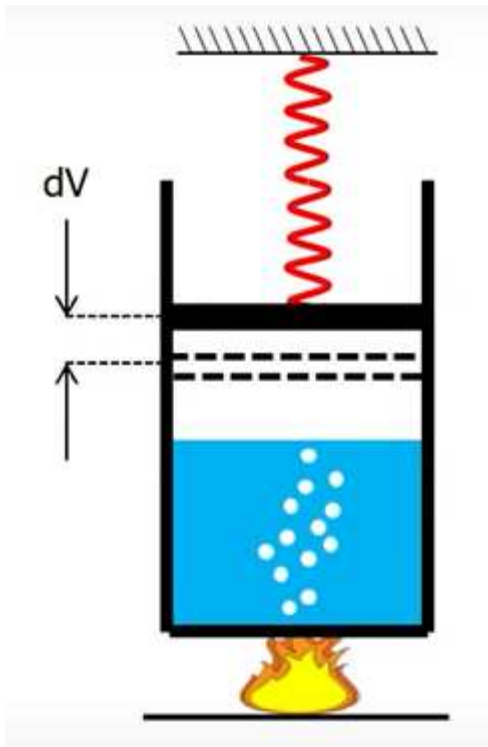
$$\delta W = F dx$$

$$\delta W = (PA) dx$$

$$\delta W = P(A dx) = P dV$$

$$\delta W = P dV$$

$${}_1^2 W = \int_1^2 p dV$$



Primeira lei da termodinâmica

- A única maneira de variar a energia de um sistema fechado é por meio de calor ou trabalho;
- Porém, a energia deve ser conservar, isto é, a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada;
- Em um sistema fechado, a energia pode ser transferida de três maneiras:

1. Calor (Q) promove o aumento ou diminuição da energia das moléculas, e conseqüentemente a energia interna do sistema.
2. Trabalho (W) é uma forma de energia que não seja proveniente de uma diferença de temperatura. A realização de trabalho sobre o sistema aumenta a energia do sistema, enquanto que a realização de trabalho pelo sistema diminui a energia dele.

A variação líquida da energia total de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia total que entra e a energia total que sai do sistema durante esse processo.

Primeira lei da termodinâmica

A 1ª Lei da Termodinâmica afirma que “**energia não se cria nem se destrói**”, e sua equação geral permite efetuar o balanço energético em qualquer sistema:

$$(E_2 - E_1) = (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) + (U_2 - U_1)$$

ou

$$\Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U$$

*KE é a energia cinética, EP é a potencial gravitacional e U representa a energia interna.

Primeira lei da termodinâmica

$$\underbrace{\delta Q}_{\text{Calor que entra}} - \underbrace{\delta W}_{\text{Trabalho que sai}} = \underbrace{dE}_{\text{Variação da energia do sistema}}$$

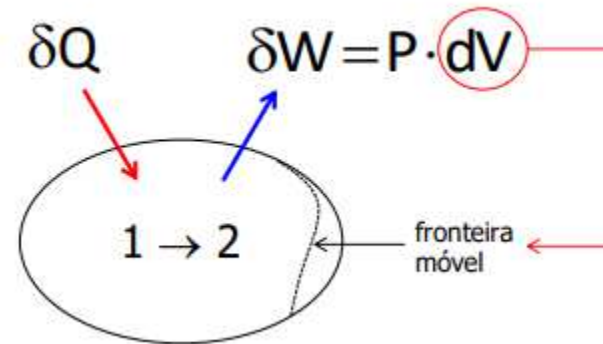
$$\int_1^2 \delta Q - \int_1^2 \delta W = \int_1^2 dE$$

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = E_2 - E_1$$

ou ainda na forma por unidade de massa:

$${}_1q_2 - {}_1w_2 = e_2 - e_1$$

Sistemas termodinâmicos

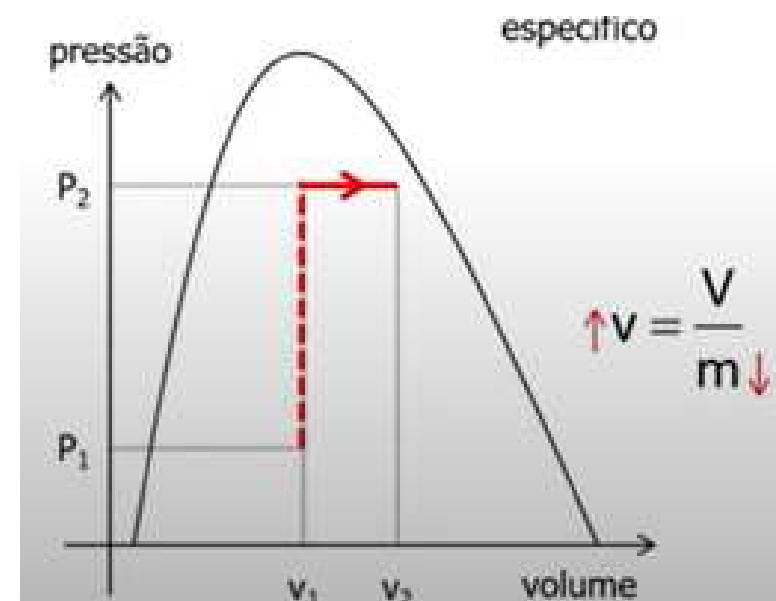
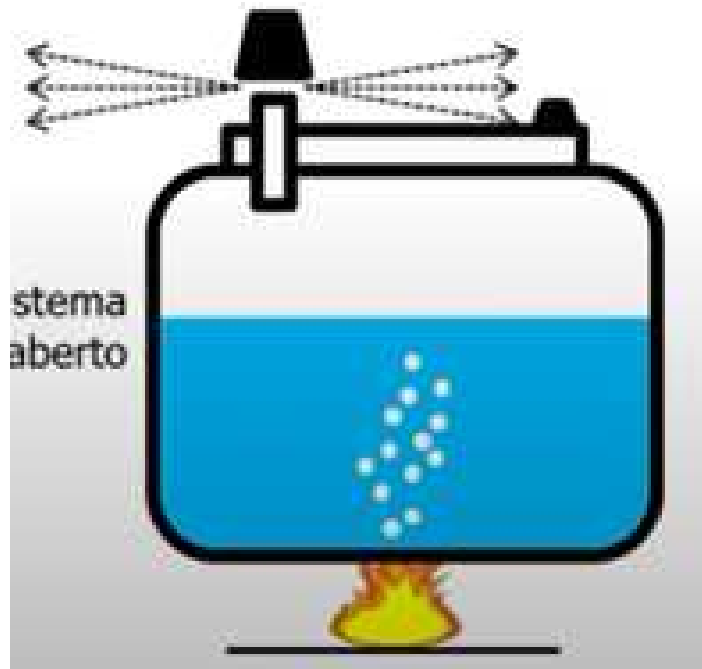
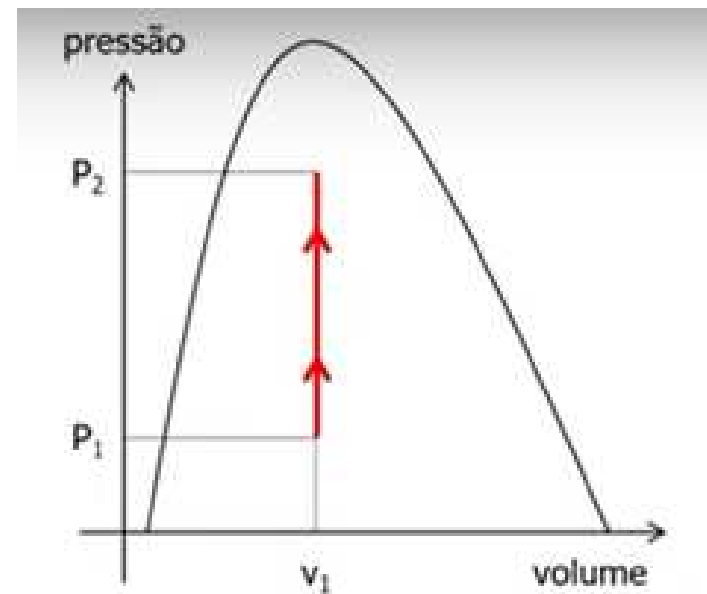
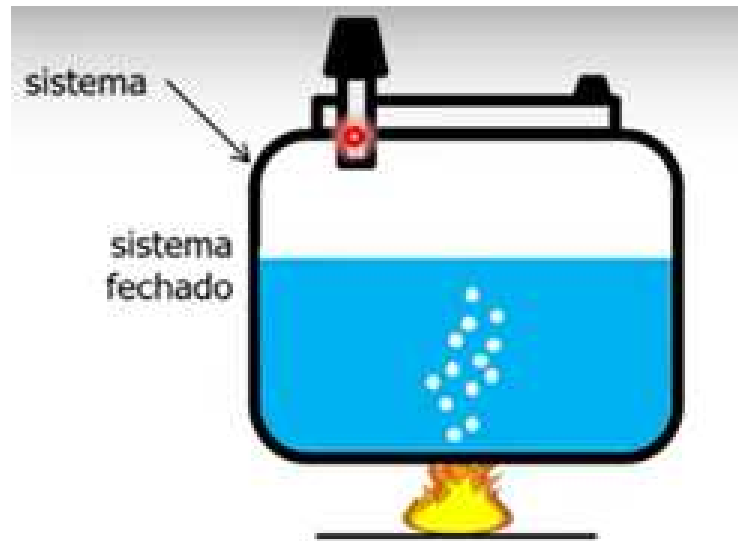


$$dU = \delta Q - \delta W$$

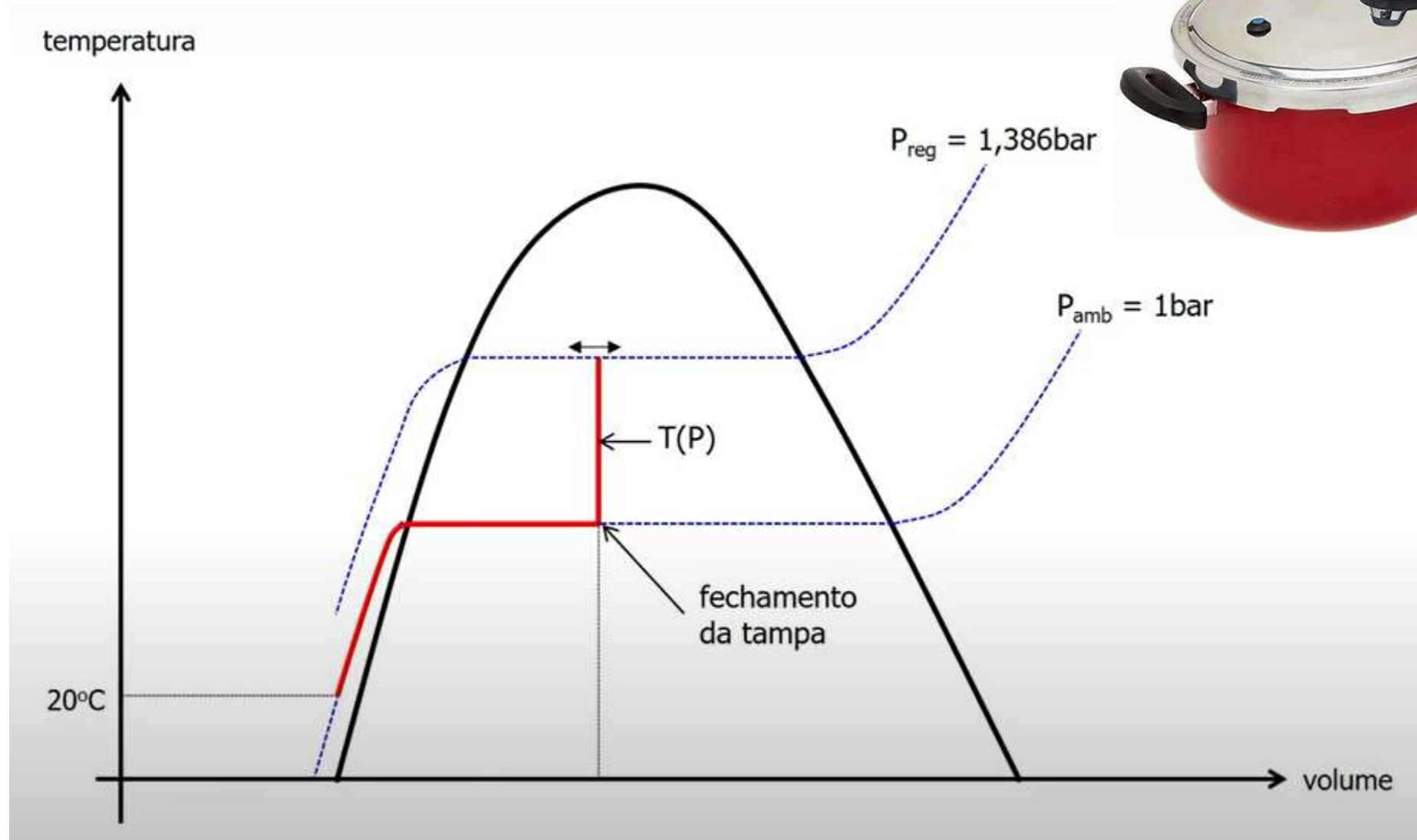
$$\int_1^2 dU = \int_1^2 \delta Q - \int_1^2 \delta W$$

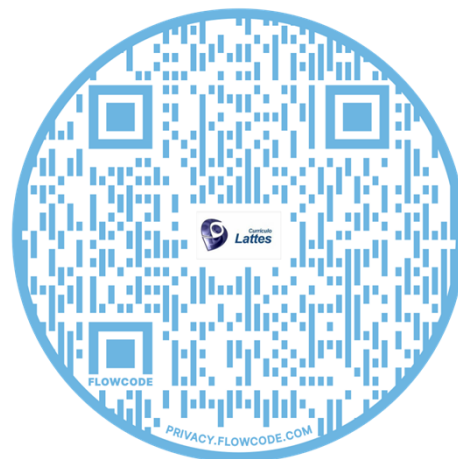
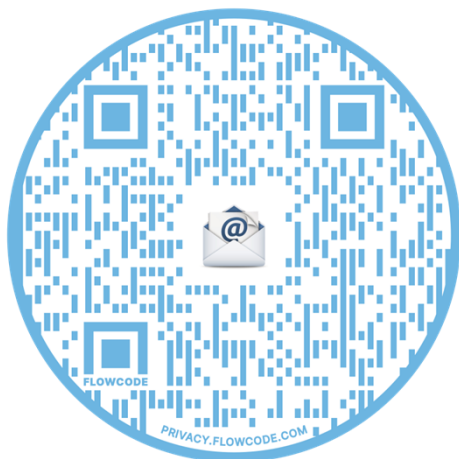
$$\Delta U = {}^2_1Q - {}^2_1W$$

Aplicação lei da termodinâmica



Aplicação lei da termodinâmica





DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos

CREA 106478D

samuelfmoreira@id.uff.br

(21) 980031100

<https://www.linkedin.com/in/samuel-moreira-a3669824/>

<http://lattes.cnpq.br/8103816816128546>